

Respuesta frecuencial de los sistemas de tiempo discreto usando herramientas interactivas

Maria Langoyo Menasanch, Ramon Costa Castelló
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona (ETSEIB)
Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)
marialangoyo@hotmail.com, ramon.costa@upc.edu

Resumen

En este trabajo se presentan un conjunto de herramientas interactivas especialmente diseñadas para el aprendizaje y la docencia de la respuesta frecuencial de los sistemas de tiempo discreto. A diferencia de muchos trabajos previos en este trabajo se caracteriza la respuesta frecuencial de tiempo discreto directamente y no utilizando la transformación bilineal.

Palabras clave: Tiempo Discreto, Respuesta Frecuencial, Interactividad, Docencia, Sysquake.

1. INTRODUCCIÓN

La última década ha conllevado una revolución en los métodos utilizados para la docencia y el aprendizaje de la teoría del control automático [1]. Este proceso de revisión ha introducido las tecnologías de la información (TIC) en el proceso de aprendizaje. Los resultados más significativo son la proliferación de numerosos laboratorios virtuales/remotos y aplicaciones gráficas interactivas que explotan la interactividad y la visualización geométrica [2, 3, 4, 5, 6]. Estas herramientas son de gran importancia durante las clases magistrales, como apoyo a la explicación presentada por el profesor, y también como herramienta de autoaprendizaje para los estudiantes a distancia. En este contexto una de las principales contribuciones de los últimos años ha sido el texto *Control automático con herramientas interactivas* [7], que ofrece un curso introductorio a la teoría clásica de control en tiempo continuo totalmente basado en el uso de herramientas interactivas.

El control clásico presenta un gran número de interpretaciones geométricas y procedimientos gráficos cuyo uso se está reforzando con la introducción de los computadores en los procesos de análisis y diseño de controladores. Además, la teoría de control, y en particular los procedimientos clásicos de diseño, contienen numerosas aproximaciones e hipótesis que simplifican los controladores y los procedimientos de diseño. La introducción de estos conceptos puede ser difícil desde un punto

de vista analítico. La representación gráfica y la interactividad pueden ser también de gran ayuda en estos casos.

Estas características han conllevado al desarrollo de diferentes herramientas relacionadas con diferentes temáticas [2]. Entre otras caben destacar herramientas relacionadas con el lugar geométrico de las raíces [8, 9], la respuesta frecuencial [10], el control predictivo [11], el principio del modelo interno [12], los sistemas con retardo temporal [13], el control tipo PID [14], el control con no linealidades estáticas [15], o la robótica móvil [16].

Algunos de los principales retos dentro de este ámbito consisten en la extensión de las herramientas interactivas a otros ámbitos de la teoría de control y la adaptación de las herramientas para su ejecución en plataformas móviles. En este trabajo no se ha abordado directamente el segundo reto. Como herramienta de desarrollo se ha utilizado Sysquake [17]. Esta herramienta está evolucionando mucho y además de soportar un desarrollo multiplataforma se prevé que en el futuro permita ejecución en dispositivos móviles.

Este trabajo presenta un conjunto de aplicaciones interactivas para el estudio de los sistemas de tiempo discreto. Las aplicaciones interactivas servirán de complemento a un texto actualmente en desarrollo [18]. Un precedente de este tipo de trabajo es [21]. Muchas de las aplicaciones que componen el proyecto han sido ya utilizado en la asignatura *Control por Computador* de la titulación de *ingeniería industrial* (plan 94) de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona (ETSEIB). En este trabajo se presentan un conjunto de nuevas herramientas ligadas al estudio de la respuesta frecuencial de los sistemas de tiempo discreto.

La respuesta frecuencial es uno de los principales conceptos de la teoría clásica de control, a diferencia de lo que pasa en los sistemas de tiempo continuo [7] la respuesta frecuencial de los sistemas de tiempo discreto no presenta una estructura clara y fácil de caracterizar a partir de los polos y ceros. Este trabajo pretende contribuir al mejor entendimiento de la misma usando los desarrollos

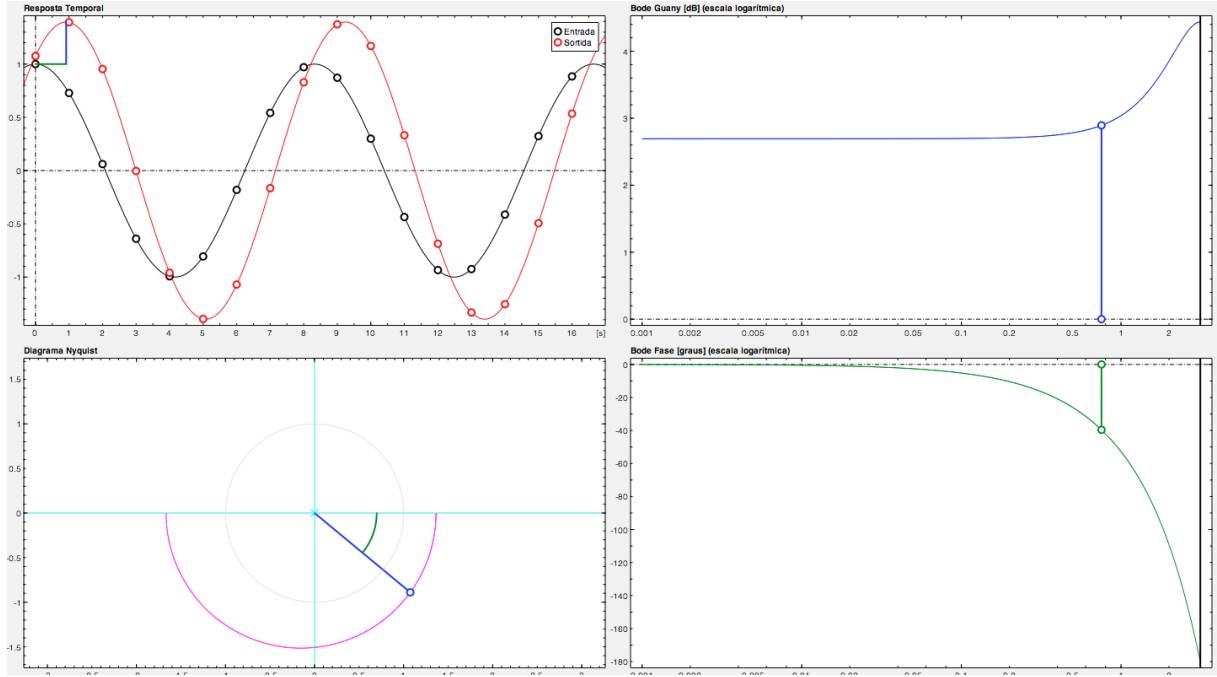


Figura 1: Concepte_freqencial_TD : Vista de la aplicación completa.

disponibles en la literatura [19]. Aunque en muchas ocasiones está ligada el trabajo se centra en los sistemas de tiempo discreto y no aborda la respuesta frecuencial de los sistemas muestreados[20].

Este trabajo está organizado de la forma siguiente. La sección 2 revisa el concepto de respuesta frecuencial para los sistema de tiempo discreto y presenta la estructura de la misma, la sección 3 analiza en detalle la respuesta frecuencial de los sistemas de primer orden y presenta la herramienta desarrollada, la sección 4 analiza en detalle la respuesta frecuencial de los sistemas de segundo orden y presenta la herramienta desarrollada y finalmente la sección 5 describe los objetivos alcanzados hasta el momento y los trabajos pendientes.

2. RESPUESTA FRECUENCIAL DE LOS SISTEMAS DE TIEMPO DISCRETO

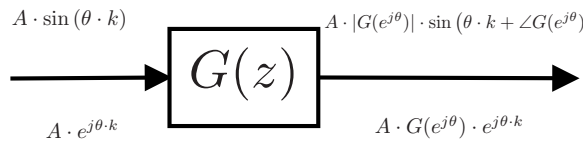


Figura 2: Respuesta temporal de los sistemas lineales estables en régimen permanente.

Dado un sistema lineal de tiempo discreto estable,

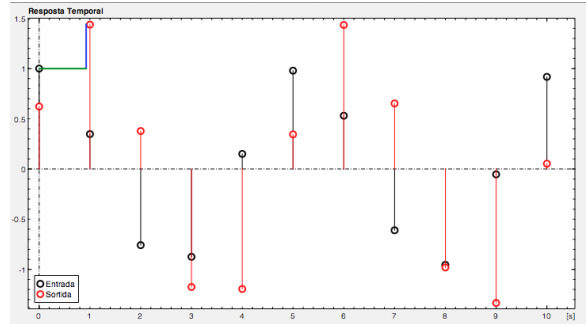


Figura 3: Concepte_freqencial_TD : Visualización de la repuesta temporal como impulsos.

Σ , es bien conocido que si en su entrada se coloca una señal de la forma:

$$u_k = \sin(\theta k)$$

la salida, en régimen permanente, es de la forma

$$y_k = M \cdot \sin(k\theta + \varphi).$$

Donde,

$$M e^{j\varphi} = G(e^{j\theta}).$$

siendo $G(z)$ la función de transferencia del sistema Σ . θ recibe en nombre de pulsación normalizada y presenta unidades de radianes. En el caso de sistemas muestreados $\theta = \omega T$ donde ω corresponde a la pulsación real y T corresponde al período de muestreo.

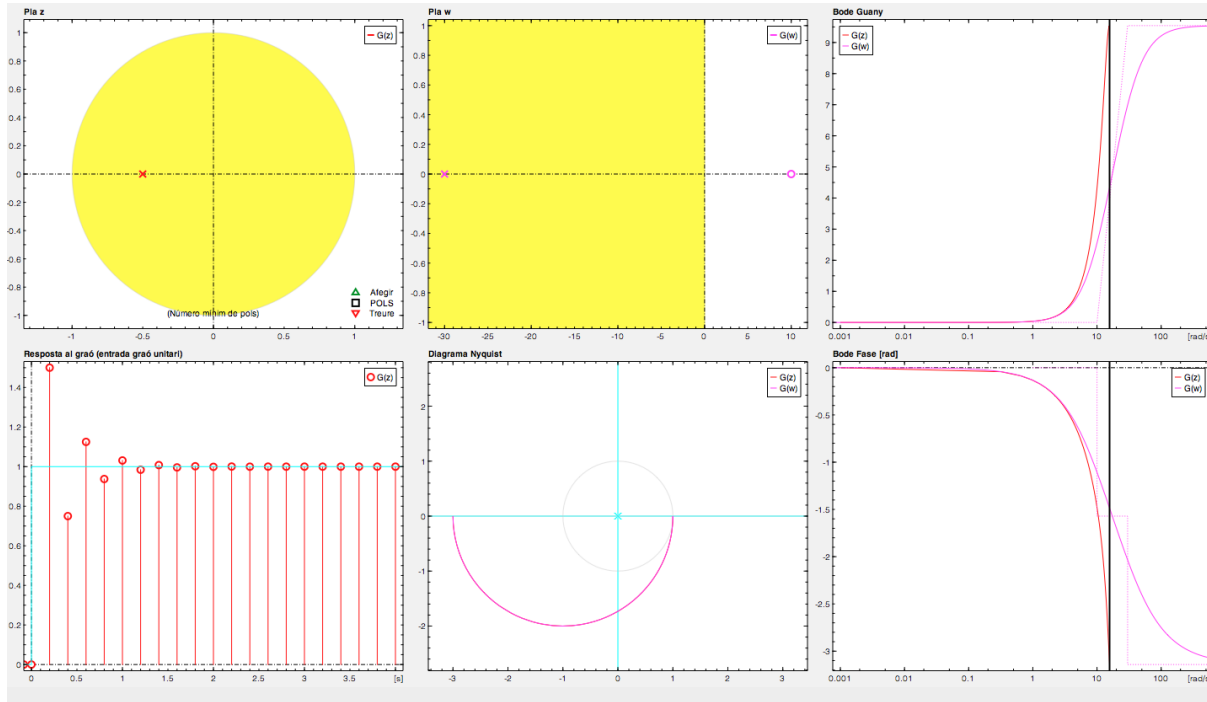


Figura 5: Transformacio_Bilineal_zw: Vista de la aplicaci3n utilizada para ilustrar el efecto de la transformada Bilineal.

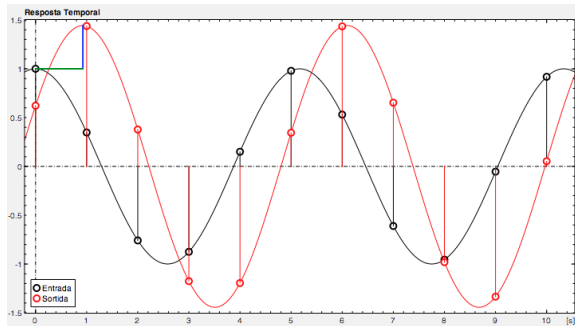


Figura 4: Concepte_TD.sinus.view : Visualizaci3n de la repuesta temporal como impulsos con envolvente continua.

Esta relaci3n suele recibir el nombre de respuesta frecuencial de los sistemas lineales. La caracterizaci3n de la respuesta frecuencial en las diferentes frecuencias se visualiza gráficamente mediante diferentes diagramas. Siendo las principales el diagrama de Bode que muestra la magnitud y fase de $G(e^{j\theta})$ en funci3n de la pulsaci3n, el diagrama polar (o diagrama de Nyquist) que corresponde a representar la parte real contra la parte imaginaria y el diagrama de Nichols que corresponde a representar la magnitud contra la fase. Cabe notar que en los dos últimos no aparece explícitamente la frecuencia. La Figura 1 muestra un volcado de pantalla de una aplicaci3n totalmente interactiva

especialmente diseñada para ilustrar el concepto de la respuesta frecuencial. Esta visualiza la respuesta temporal y las diferentes representaciones de la respuesta frecuencial.

Una de las dificultades de interpretaci3n de la respuesta frecuencial de tiempo discreto corresponde al hecho que la señal de entrada y salida est3 únicamente definida en instantes de tiempo concretos. La Figura 3 muestra la entrada y salida de un sistema, como se puede observar resulta complicado visualizar la forma sinusoidal (sobretudo cuando la frecuencia es elevada y por tanto el númer de muestras reducido). La Figura 4 muestra esta misma señal visualizando su envolvente. Esta segunda visualizaci3n es m3s f3cil de interpretar pero puede crear confusi3n entre los estudiantes.

Algunas particularidades de la respuesta frecuencial de tiempo discreto son :

- La respuesta frecuencial es peri3dica: es decir $G(e^{j\theta}) = G(e^{j(\theta+2\pi)})$.
- La respuesta frecuencial es simétrica: es decir $G(e^{j\theta}) = \overline{G(e^{j(\theta-\pi)})}$.
- La respuesta frecuencial se suele pintar en el rango $\theta = [0, \pi]$. Cualquier otro valor es expresable en funci3n de este rango.
- La respuesta frecuencial empieza y finaliza sobre el eje real. $G(1) = G(e^{j0}) \in \mathbb{R}$ y

$$G(-1) = G(e^{j\pi}) \in \mathbb{R}.$$

La respuesta frecuencial de tiempo discreto no presenta una estructura asintótica. Esta particularidad hace que sea difícil desarrollar una intuición sobre la forma de la respuesta frecuencial a partir de los componentes de la función de transferencia como se hace en los sistemas de tiempo continuo.

La respuesta frecuencial tiene interés en sí misma pues caracteriza el comportamiento de los sistemas, pero presenta además el valor añadido de caracterizar la estabilidad de lazo cerrado a través del criterio de Nyquist [22, 23] (y el simplificado de Bode [22, 23]). Por todo ello resulta de especial interés introducir este concepto a los estudiantes y que estos desarrollen intuición sobre ella.

En muchas ocasiones, y con el objetivo de simplificar la estructura o aplicar métodos de diseño de tiempo continuo en el campo frecuencial se suele utilizar la transformada Bilineal (o transformada de *Tustin*). Esta transforma la respuesta frecuencial de tiempo discreto en otra que presenta características similares a las de la respuesta frecuencial de tiempo continuo, estructura asintótica entre otras. La Figura 2 muestra una aplicación totalmente interactiva diseñada para visualizar el efecto de la transformada bilineal sobre la respuesta frecuencial de los sistemas de tiempo discreto.

Aunque es posible realizar diseño de controladores de tiempo discreto directamente en el campo frecuencial [24, 25, 26, 27], la complejidad de la respuesta frecuencial y la falta de intuición constituyen un cierto freno.

Una función de transferencia, $G(z)$, puede descomponerse de la forma:

$$G(z) = \frac{N(z)}{D(z)} = \frac{k \prod_n (z - z_n) \prod_x (z - r_x e^{j\theta_x})}{\prod_l (z - p_l) \prod_m (z - r_m e^{j\theta_m})}.$$

Esta decomposición puede usarse para calcular la ganancia de la respuesta frecuencial:

$$\begin{aligned} 20 \log_{10} (|G(e^{j\omega})|) &= 20 \log_{10} (|k|) \\ &+ \sum_n 20 \log_{10} (|e^{j\omega} - z_n|) \\ &+ \sum_x 20 \log_{10} (|e^{j\omega} - r_x e^{j\theta_x}|) \\ &- \sum_l 20 \log_{10} (|e^{j\omega} - p_l|) \\ &- \sum_m 20 \log_{10} (|e^{j\omega} - r_m e^{j\theta_m}|) \end{aligned}$$

De forma similar la fase puede escribirse de la forma:

$$\begin{aligned} \angle (G(e^{j\omega})) &= \angle k \\ &+ \sum_n \angle (e^{j\omega} - z_n) + \sum_x \angle (e^{j\omega} - r_x e^{j\theta_x}) \\ &- \sum_l \angle (e^{j\omega} - p_l) - \sum_m \angle (e^{j\omega} - r_m e^{j\theta_m}) \end{aligned}$$

Como puede comprobarse la respuesta frecuencial puede caracterizarse a partir del conocimiento de las respuestas frecuenciales de sistemas de primer y segundo orden. Por dicho motivo el conocimiento de la respuesta frecuencial de los sistemas de primer y segundo orden es de particular interés y puede aportar intuición en la interpretación de la respuesta frecuencial de los sistemas genéricos. En las siguientes secciones se analiza como es la respuesta frecuencial de estos sistemas siguiendo los desarrollos descritos en [19] y se presentan las aplicaciones interactivas desarrolladas para facilitar su estudio.

3. RESPUESTA FRECUENCIAL DE LOS SISTEMAS DE PRIMER ORDEN

3.1. ANALISIS

Como base para el estudio de la respuesta frecuencial de los sistemas de primer orden se toma la ecuación:

$$r(z, a) = \frac{z - a}{1 - a}, a \in \mathbb{R} - 1. \quad (1)$$

Esta correspondería a una función de transferencia con un cero en $z = a$ y una ganancia en continua normalizada a 1. A partir de las características de $r(e^{j\theta}, a)$ puede fácilmente caracterizarse la respuesta frecuencial de un sistema de primer orden con un polo en $z = a$ y ganancia en continua unitaria ($\frac{1}{r(z, a)}$).

La respuesta frecuencial de (1) queda definida por:

$$r(e^{j\theta}) = \frac{\cos(\theta) - a}{1 - a} + j \frac{\sin(\theta)}{1 - a}.$$

El módulo de esta función es una función monótona que presenta sus valores extremos en :

$$|r(1)| = 1, |r(-1)| = \frac{(1 + a)}{1 - a}$$

en función del valor de a el mínimo o el máximo se produce en la última frecuencia. En concreto, para valores de a positivos, la función describe un perfil paso alto mientras que para valores a negativos la función describe un perfil paso bajo.

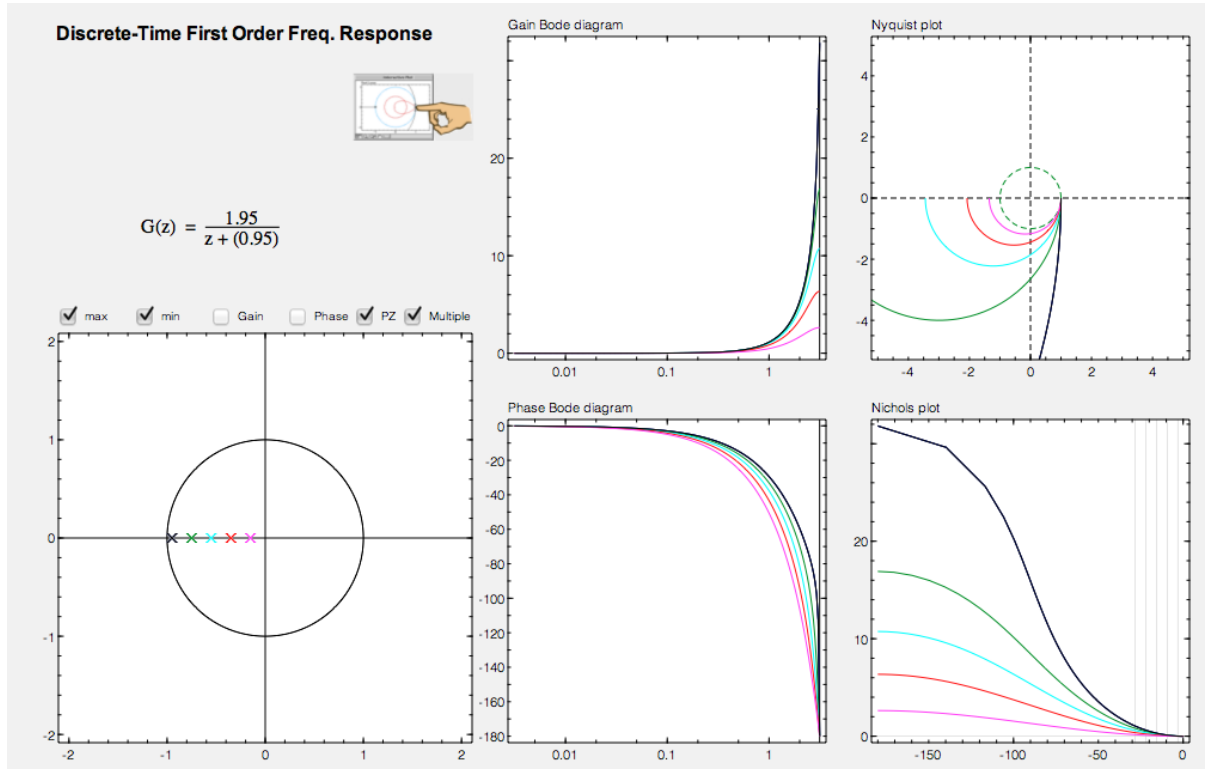


Figura 6: res.freq_TD_1r_ordre: Aplicación para analizar la respuesta frecuencial de los sistemas de primer orden.

La fase de la función es de la forma:

$$\angle r(e^{j\theta}) = \text{tg}^{-1} \left(\frac{\sin(\theta)}{\cos(\theta) - a} \right).$$

Cuando a está dentro del círculo unidad la fase es monótona creciente, empieza en 0 rad y acaba en π rad. Cuando a está fuera del círculo unidad presenta un punto singular en: $\theta = \text{acos}(\frac{1}{a})$ en el que toma el valor de $\text{tg}^{-1} \left(-\frac{\text{sgn}(a)}{\sqrt{a^2-1}} \right)$.

3.2. LA HERRAMIENTA

La Figura 6 muestra la aplicación que se ha desarrollado para ilustrar la respuesta frecuencial de los sistemas de primer orden, en la parte izquierda se muestra las características del sistema y se incorpora un editor de polos/ceros que permite cambiar interactivamente su valor. Esta parte incorpora además algunos selectores que permiten modificar las características de la aplicación, activar un visualizador del valor máximo/mínimo de la ganancia o fase, activar la visualización de diferentes sistemas simultáneamente, y finalmente decidir si se trabaja en modo polo o modo cero.

En la parte derecha se muestran los diagramas que ilustran la respuesta frecuencial, Bode, Nyquist y Nichols. Sobre estos diagramas se muestran los indicadores de valores mínimo y máximo tanto en

ganancia como en fase. Estos pueden moverse interactivamente, a partir de ellos se actualizan automáticamente los polos/ceros que las generan.

Finalmente la aplicación incorpora un menú que permite cambiar el idioma de la aplicación, cargar algunos ejemplos prediseñados además de reconfigurar la vista de la aplicación.

4. RESPUESTA FRECUENCIAL DE LOS SISTEMAS DE SEGUNDO ORDEN

4.1. ANALISIS

Como base para el estudio de la respuesta frecuencial de los sistemas de primer orden se toma la ecuación:

$$c(z, \delta, \rho) = \frac{z^2 - 2 \cdot \rho \cos(\delta) \cdot z + \rho^2}{1 + \rho^2 - 2 \cdot \rho \cdot \cos(\delta)}. \quad (2)$$

Esta correspondería a una función de transferencia con un cero en $z = \rho e^{j\delta}$ y una ganancia en continua normalizada a 1.

La ganancia de (2), $|c(e^{j\theta}, \delta, \rho)|$, presenta una forma que depende de la región del plano z en que se halle el cero. Estas regiones están indicadas en la Figura 7. Si el cero se halla en las regiones G1,

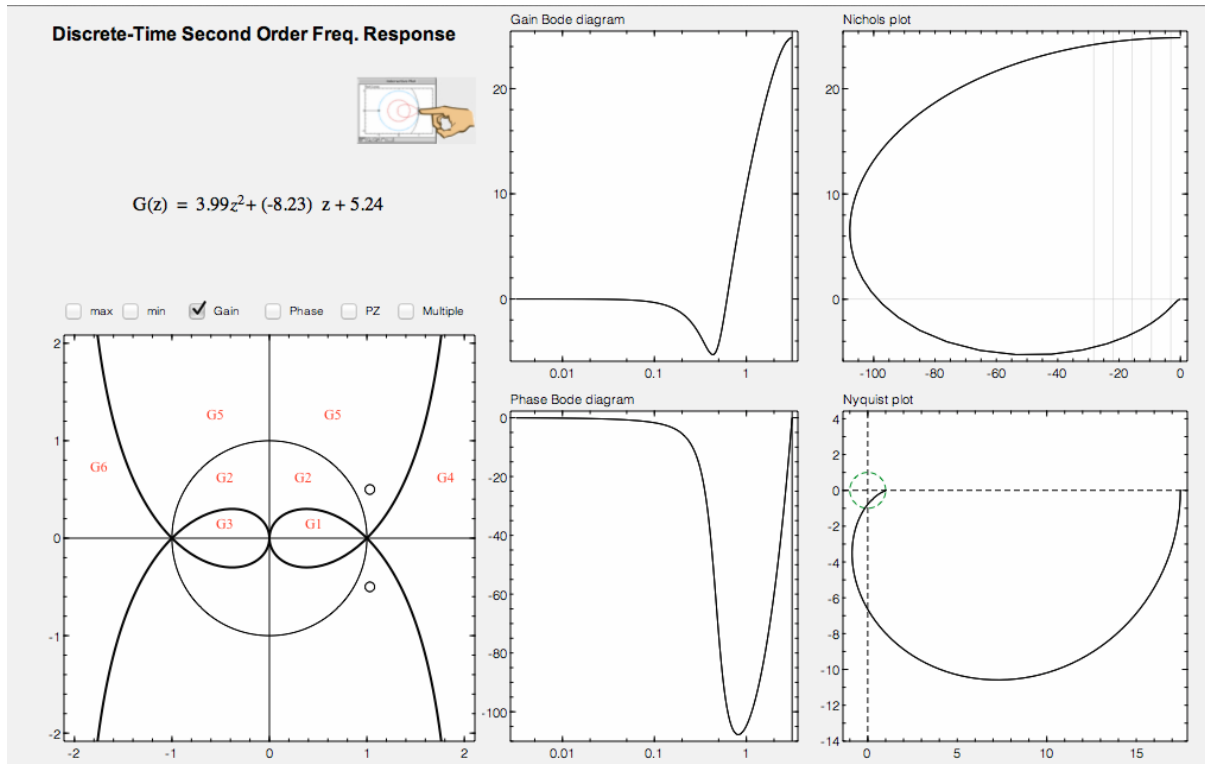


Figura 7: res_freq_TD_2n_ordre: Aplicación para analizar la respuesta frecuencial de los sistemas de segundo orden.

G4, G3 o G6 la evolución es monótona, en el caso de G1 o G4 se trata de una monotonía creciente (paso alto) mientras que en G3 o G6 se trata de una monotonía decreciente (paso bajo). En el caso que el cero pertenezca a G2 o G5 la curva presenta un punto singular en $\theta = \arccos\left(\frac{\cos(\delta)(\rho^2+1)}{2\rho}\right)$ y la ganancia en dicha frecuencia toma el valor $\sqrt{\frac{(\rho^2-1)^2(\sin(\delta))^2}{(2\rho\cos(\delta)-\rho^2-1)^2}}$, que es siempre menor que la unidad; en estos casos la respuesta puede ser paso alto o paso bajo (si el cero está en el semiplano derecho es paso alto mientras que es paso bajo si está en el semiplano izquierdo).

La fase de (2), $\angle c(e^{j\theta}, \delta, \rho)$, presenta una forma que depende de la región del plano z en que se halle el cero. Estas regiones están indicadas en la Figura 8. En la región P7 presenta una evolución monótona creciente, empezando en 0 rad y finalizando en 2π rad. En el resto de regiones la fase presenta uno o dos puntos singulares.

Dado que la regiones de fase y las regiones de ganancia son diferentes puede comprobarse que el tipo de comportamientos cualitativos que pueden obtenerse es bastante numeroso.

4.2. LA HERRAMIENTA

La Figura 7 muestra la aplicación que se ha desarrollado para ilustrar la respuesta frecuencial, en la parte izquierda se muestra las características del sistema y se incorpora un editor de polos/ceros que permite cambiar interactivamente su valor. Esta parte incorpora además algunos selectores que permiten modificar las características de la aplicación, activar un visualizador del valor máximo/mínimo de la ganancia o fase, activar la visualización de diferentes sistemas simultáneamente, y finalmente decidir si se trabaja en modo polo o modo cero. En el caso de trabajar en modo ganancia se activa sobre el diagrama de polos y zeros el dibujo de las regiones de ganancia mientras que si se trabaja en fase se activa el diagrama de las regiones de fase. Ambos tipos de regiones pueden estar activas simultáneamente.

En la parte derecha se muestran los diagramas que ilustran la respuesta frecuencial, Bode, Nyquist y Nichols. Sobre estos diagramas se muestran los indicadores de valores mínimo y máximo tanto en ganancia como en fase. Estos pueden moverse interactivamente, a partir de ellos se actualizan automáticamente los polos/ceros que las generan.

Finalmente la aplicación incorpora un menú que permite cambiar el idioma de la aplicación, cargar

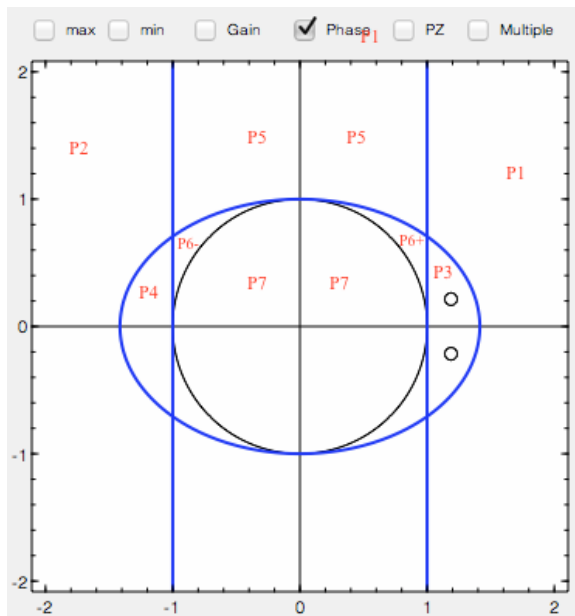


Figura 8: res.freq_TD.2n_ordre: Regiones de estructuración de la fase de la respuesta frecuencial.

algunos ejemplos prediseñados además de reconfigurar la vista de la aplicación.

5. CONCLUSIONES

La respuesta frecuencial es uno de los principales conceptos utilizados en la teoría clásica de control, ya sea para la caracterización del comportamiento de un sistema o para la caracterización de la estabilidad de lazo cerrado. Como se ha podido observar la respuesta frecuencial de los sistemas de tiempo discreto es bastante más compleja que la que presentan los sistemas de tiempo continuo, además resulta complicado definir conceptos como la frecuencia de corte que son tan útiles y utilizados en tiempo continuo. En este trabajo se han presentado un conjunto de herramientas interactivas diseñadas para dar soporte al estudio de la respuesta frecuencial. Estas aplicaciones son totalmente gráficas e interactivas y forman parte de un proyecto más amplio que pretende vertebrar un curso de *Control por computador* basado en aplicaciones interactivas.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por los proyectos MICINN DPI2011-25649.

Referencias

- [1] S. Dormido. Control learning: Present and future. *Annual Reviews in Control*, 28(1):115–136, 2004.
- [2] Francisco A. Candelas Herías and José Sánchez Moreno. Recursos didácticos basados en internet para el apoyo a la enseñanza de materias del área de ingeniería de sistemas y automática. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 2(2):93–101, Abril 2005.
- [3] Valeri Kroumov, Keishi Shibayama, and Akira Inoue. Interactive learning tools for enhancing the education in control systems. In *33rd ASEE/IEEE Frontiers in Education Conference*, Boulder, CO, 5-8 November 2003.
- [4] S. Dormido. The role of interactivity in control learning. In *6th IFAC Symp. on Advances in Control Education*, pages 11–22, 2003.
- [5] José Luis Guzman, Ramon Costa-Castelló, Sebastián Dormido, and Manuel Berenguel. Study of fundamental control concepts through interactive learning objects. In *Preprints of the 18th World Congress of the International Federation of Automatic Control (IFAC)*, pages 7286–7291, Milano, Italy, August 28 - September 2 2011. ISBN-10: 10/38430 – ISBN-13:978-84-693-1779-2.
- [6] Jose Luis Guzmán, Ramon Costa-Castelló, Sebastián Dormido, and Manuel Berenguel. Interactive tools to learn basic concepts of nonlinear systems linearization through a case study. In *9th IFAC Symposium in Advances in Control Education.*, volume 9, Resort Automobilst, Russia, 12-15 December 2012.
- [7] José Luis Guzmán Sánchez, Ramon Costa Castelló, Manuel Berenguel Soria, and Sebastián Dormido Bencomo. *Control automático con herramientas interactivas*. Pearson, 2012. ISBN: 9788483227503.
- [8] M. Cywiak and M. Castro. Simple technique for root locus plotting. *Revista Mexicana de Física*, 48(6):556–564, December 2002.
- [9] Tomás Oliveira e Silva. Automatic generation of root locus plots. *Revista do DETUA*, 2(3):273–276, September 1998.
- [10] Erik Cheever and Yue Li. A tool for construction of bode diagrams from piecewise linear asymptotic approximations. *The International Journal of Engineering Education*, 21(2):335–340, 2005.
- [11] J.L. Guzmán, M. Berenguel, and S. Dormido. Interactive teaching of constrained generalized predictive control. *IEEE Control Systems Magazine*, 25(2):52–66, 2005.

- [12] Lluís Diaz Guerra, Germán A. Ramos Fuentes, Hector Vargas, and Ramon Costa-Castelló. A virtual/remote laboratory to illustrate the internal model principle for periodical signals. In *The 8th IFAC Symposium on Advances in Control Education (ACE2009)*, pages 1–6, Kumamoto, Japan, October 21–23, 2009.
- [13] J. Normey-Rico, J.L. Guzmán, S. Dormido, M. Berenguel, and E.F. Camacho. An unified approach for DTC design using interactive tools. *Control Engineering Practice*, 17:1234–1244, 2009.
- [14] J.L. Guzmán, K.J. Åstroöm, S. Dormido, T. Hägglund, M. Berenguel, and Y. Piguet. Interactive learning modules for PID control. *IEEE Control System Magazine*, 28(5):118–134, 2008.
- [15] S. Dormido, F. Gordillo, S. Dormido-Canto, and J. Aracil. An interactive tool for introductory nonlinear control systems education. In *15th IFAC World Congress b '02*, pages 11–22, Barcelona, Spain, 2002.
- [16] J.L. Guzmán, F. Rodríguez, M. Berenguel, and S. Dormido. Interactive tool for mobile robot motion planning. *Robotics and Autonomous Systems*, 56(5):396–409, 2008.
- [17] Y. Piguet. *SysQuake 5: User Manual*. Calerga Sàrl., Laussane, Switzerland, 2009.
- [18] Ramon Costa Castelló and Enric Fossas. *Sistemas de Control en Temps Discret*. Edicions UPC, 2014. ISBN: 978-84-9880-492-8.
- [19] Bernardo A. León de la Barra and Raul Prieto. On the frequency response of scalar discrete-time systems. *Automatica*, 35:1843–1853, 1999.
- [20] Y. Yamamoto and P.P. Khargonekar. Frequency response of sampled-data systems. *Automatic Control, IEEE Transactions on*, 41(2):166–176, Feb 1996.
- [21] Roland Longchamp. *Comande Numériques de Systèmes Dynamiques. Cours d'Automatique*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Laussane, 2006.
- [22] Benjamin C. Kuo. *Digital Control Systems*. The Oxford Series in Electrical and Computer Engineering. Oxford University Press, second edition edition, 1999. ISBN-10: 0195120647.
- [23] Katsuhiko Ogata. *Discrete-Time Control Systems*. Prentice Hall, second edition edition, 1995. ISBN-10: 0130342815.
- [24] K.S. Yeung and K.Q. Chaid. Bode design formulas for discrete compensators. *Electronics Letters*, 22(24):1304–1305, November 1986.
- [25] Manuel F. Pérez Polo, José Ángel Berná Galiano, and Javier Gil Chica. Diseño gráfico de filtros digitales de avance y retardo de fase. aplicación a la enseñanza de control por computador. In *XXVI Jornadas de Automática.*, pages 1–14, Alicante, 2005.
- [26] William Messner. Simple formulas for direct design of discrete-time lead compensators. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 122(2):358–360, January 1999.
- [27] R. Zanasi and Stefania Cuoghi. Direct method for digital lead-lag design: analytical and graphical solutions. In *Automation Science and Engineering (CASE), 2011 IEEE Conference on*, pages 804–809, 2011.